

## 단계별 성장 개념의 기질 이용과 미생물 호흡모델 개발

Development of the Substrate Utilization and Respiration Model  
by the Step Growth Concept

김연권\* · 서인석\*\* · 김홍석\*\*\* · 김지연\*\*\*\*

Kim, Youn Kwon · Seo, In Seok · Kim, Hong Suck · Kim, Ji Yeon

## Abstract

Recently, mathematical modeling for the activated sludge process is important to design and control of wastewater treatment plant. Nevertheless, there is a lack of information regarding the pathway of substrate utilization between external and internal substrates in biological nutrient removal (BNR). In this research, a new activated sludge model (step growth model) is proposed and compare with ASM No.3. This model structure is consist of five processes; aerobic storage, growth on external substrate and stored intercellular storage compounds (ISCs), endogenous respiration and aerobic respiration of ISCs. The predicted results by the step growth model were more good accordance with the results of oxygen utilization rate (OUR) and TCOD experiment than that of the ASM No.3.

**Keywords :** ASM No.3, step growth model, microbial respiration, simulation

## 요 지

최근, 활성 슬러지 공법에 대한 수학적 모델링은 폐수처리장의 설계와 운영에 있어서 매우 중요한 인자로 인식되고 있다. 그럼에도 불구하고, BNR 공정에서 미생물의 성장 및 호흡과 관련한 내·외부 기질의 이용 경로에 관한 정보는 여전히 부족한 실정이다. 본 논문에서는 ASM No.3와 비교되는 새로운 개념의 활성슬러지 모델을 제시하고자 한다. 미생물의 단계별 성장이론에 근거한 이 모델의 구조는 호기성 저장, 내부저장물질(ISCs; Intercellular Storage Compounds)과 외부기질 활용에 따른 미생물의 성장, 내생호흡과 내부저장물질을 이용한 호기성 호흡 등 5 단계로 구성되어 있다. 단계적 성장모델에 기초한 예측결과는 산소이용율(OUR)과 TCOD에 의한 실험결과에 있어 ASM No. 3의 결과보다 더욱 일치함을 나타냈다.

**핵심용어 :** ASM No.3, 단계적 성장 모델, 미생물 호흡, 모델모사

## 1. 서 론

최근, 활성 슬러지 처리에서 미생물의 신진대사 모니터링에 관한 수학적 모델의 적용은 폐수처리장의 설계와 최적화에 매우 중요한 운영기법이 되고 있다(Spanjers *et al.*, 2001). 1987년 IAWQ task group은 유기물과 질소제거 시물레이션을 위한 Activated Sludge Model(ASM) No.1을 발표하였다. ASM No.1은 일반 활성슬러지 공법의 운영에 있어 훌륭한 시물레이터로 활용되어 왔으며, 이후 IAWQ task group은 호기성 저장과 내부저장물질간의 관계를 설명한 ASM No.3를 발표하였다(Gujer *et al.*, 1999). ASM No.1에서는 heterotrophs 성장이 외부기질 중 readily biodegradable COD(RBCOD) 성분에서 기인하며 입자성 inert COD(XP)는 저장의 개념과는 무관한 미생물의 decay

에서 기인한 것이라고 전제한다. 반면 ASM No.3에서는 미생물이 기질과 접촉하는 반응초기에 외부기질 중 RBCOD 성분을 Poly- $\beta$ -hydroxybutylate(PHB)와 glycogen 와 같은 미생물 내부저장물질(ISCs)로 우선적으로 변환하여 저장하게 되며 저장된 ISCs(intracellular storage compounds, mg COD L<sup>-1</sup>)를 이용하여 성장하는 것으로 표현하고 있다. ASM No.1과 ASM No.3 간의 기질이용 경로와 미생물 성장에 대한 개념은 Fig. 1과 같이 요약할 수 있다. 미생물의 기질이용과 성장은 많은 연구자들에 의해 재검증되고 있으며 이와 같은 개념에서 재해석된 모델은 Chundakkau and van Loosdrecht(1999)에 의해 제안된 변형된 ASM No.3에 이르기까지 최근까지도 보완되고 있다(Majone *et al.*, 1996; van Aalst-van Leeuwen *et al.*, 1997). 그럼에도 불구하고, 활성 슬러지 처리공정에서 미생

\*정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원(E-mail : 201commando@hanmail.net)

\*\*정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원

\*\*\*한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

\*\*\*\*한국수자원공사 수자원연구원 연구원

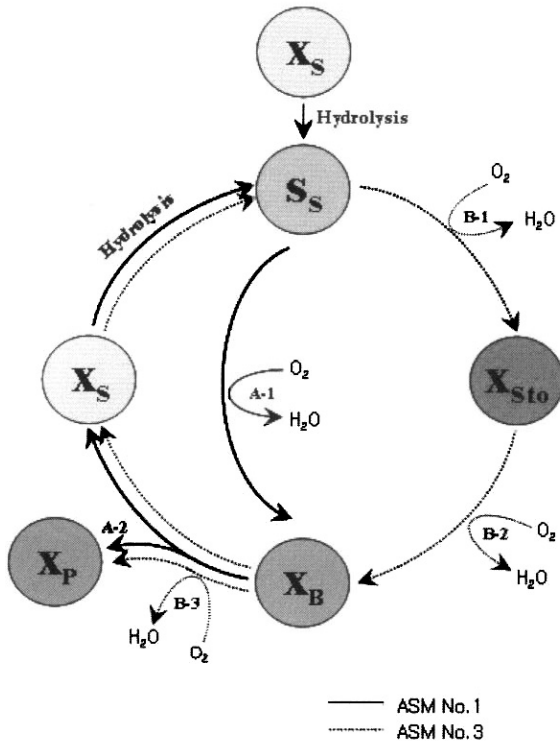


Fig. 1 Flow of organic species in traditional and aerobic storage models

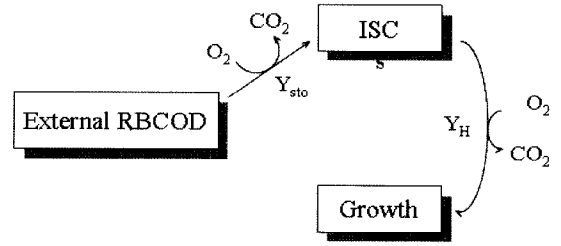
물의 기질이용과 성장간의 관계를 이해함에 있어 내·외적 기질이용과 그 경로에 대한 정보와 이해는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 활성슬러지 공정에서 미생물의 기질이용과 호흡을 변화간의 관계를 이용하여 미생물의 기질이용 경로를 평가하고, 본 논문에서 제안하는 새로운 모델인 단계별 성장 모델과 ASM No.3와의 오염물질거동특성 및 시뮬레이션 결과 비교를 통해 미생물의 기질이용 경로에 대한 보다 정확한 이해와 정보를 얻고자 한다. 본 연구에서 얻어진 결과는 활성슬러지 공정에서 폐수의 특성과 미생물의 기질이용 특성에 따라 탄소원의 효율적인 이용방안 마련과 해당 공정의 안정적 운전에 대한 최적인 대안마련에 중요한 자료가 될 것으로 기대한다.

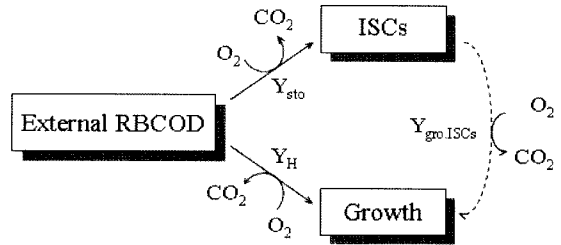
## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 모델의 구성

활성슬러지 공정에서 미생물의 기질이용과 호흡, 그리고 성장간의 수학적 해석은 해당 공정의 안정적 운영과 문제점 예측 및 대안마련에 있어 매우 중요한 요소가 된다. ASM No.3는 산소소모를 외부기질의 미생물 내부저장, 미생물 증식, 내부 저장물질의 재이용과 decay 등의 과정으로 구성되어 있으며, 특히 기질이용 경로의 관점에서 외부 기질은 우선적으로 미생물 내부로 저장되어지고 이후 미생물은 저장된 ICs를 또 다른 기질로 이용하여 성장하는 것으로 표현하고 있다. 그러나 이와 같은 모델의 구성은 실제 미생물 호흡을 그래프의 초기에 나타나는 급격한 호흡을 증가현상과 외부기질의 고갈 이후 나타나는 호흡을 그래프의 꼬리 현상(tailing response)을 설명하는데 충분하지 못하다. 이에



a) ASM No.3



b) Step growth model

Fig. 2 Comparison of conceptual activated sludge models. (Continuous bold and dot lines represented first and second step, respectively)

본 연구는 단계별 성장 개념(Kim *et al.*, 2005)에 기초하여 미생물의 기질이용과 호흡간의 관계를 재구성하였다. 미생물의 성장과 호흡은 외부기질(external RBCOD)에 의한 성장과 미생물 내부로 저장된 내부저장물질이 동시에 활용되는 1단계 구간과 외부기질이 고갈된 이후 내부저장물질인 ICs를 이용하여 성장하는 2단계 구간으로 나누었다. 이때 미생물의 내부저장물질은 COD 단위로 통합하여 ISC로 표현하였으며, 이상의 모든 개념적 차이를 정리·비교하면 다음 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

외부기질과 미생물 내부의 저장물질간의 기질이용과 호흡과의 관계를 단계별 성장 개념에 따라 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 총 호흡율은 외부기질과 내부 저장물질을 이용하여 성장할 때 나타나는 성장관련 호흡과 외부기질을 미생물 내부로 저장하기 위한 호흡, 그리고 미생물 자체의 내생호흡으로 나눌 수 있다.

$$OUR_{Total} = OUR_{growth} + OUR_{storage} + OU_{Rendogenous} \quad (1)$$

$$OUR_{growth} = OUR_{ex.subs.} + OUR_{ICs} \quad (2)$$

where :  $OUR_{growth}$  = substrates oxidation

$OUR_{storage}$  = ICs storage

$OUR_{endogenous}$  = endogenous respiration

$OUR_{ex.subs.}$  = external substrates oxidation

$OUR_{ICs}$  = ICs oxidation

### 2.2 Kinetic parameter와 Process rate 결정

Table 1에서 보는 바와 같이, 모델 구성에 사용된 동력학적 계수 값은 사전 수행된 동력학적 계수실험의 실험값을 사용했으며, 그 외 값은 ASM No.3에서 제안하는 값을 따랐다. 단계별 성장 모델의 Stoichiometric 매트릭스는 성장, 내생호흡, decay 등을 포함한다(Table 2). 이렇게 구성된 단계별 성장 모델의 process 별 구성 및 기존 ASM No.3와의 비교는 다음 Table 3과 같다.

Table 1. Values of model parameter for the ASM No.3 and Step Growth Model

Model Parameters	Yield coefficient			Growth rate	
	$Y_H$	$Y_{sto}$	$Y_{gro.ISCs}$	$\mu_H$	$\mu_{ISCs}$
ASM No.3	0.67	0.85		2.7	
Step Growth Model	0.59	0.85	0.45	2.7	3.5

Table 2. Stoichiometric matrix of the Step Growth Model

	Ss	So <sub>2</sub>	Xsto	X <sub>H</sub>	Simplified rate expression
Heterotrophic growth					
Storage of COD	-1	$-(1-Y_{sto})$	$+Y_{sto}$		$k_{sto} \cdot X_H$
Growth on ex.sub.		$-(1-Y_H)/Y_H$	$-1/Y_H$	1	$\mu_H \cdot X_H$
Growth on ISCs		$-(1-Y_{gro.ISCs})/Y_{gro.ISCs}$	$-1/Y_{gro.ISCs}$	1	$\mu_{ISCs} \cdot X_H$
Endogenous respiration concept					
Cells		$-(1-f_i)$	$f_i$	-1	$ke \cdot X_H$
ISCs		-1	-1		$ke \cdot X_H$
Decay concept					
Decay of cells			$+1-f_i$	-1	$b_H \cdot X_H$
Decay of ISCs			+1		$b_{sto} \cdot X_H$

### 2.3 실험방법

실험에 사용된 미생물은 100,000 ton/day 규모의 일반 활성슬러지 공법 호기조에서 채취된 미생물을 글루코스와 펄톤을 탄소원으로 사용하는 합성폐수를 원수로 실험실 규모(Q=45 L/d)의 동일한 일반 활성 슬러지공법에서 6개월 이상 배양시켜 실험에 사용하였다. 합성폐수의 조성은 COD의 경우 320±10 mg/L, NH<sub>4</sub>Cl과 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 질소와 인 공급원으로 사용하여 질소와 인의 농도가 각각 30 mg/L과 7 mg/L이 되도록 조절하였다. 실험기간 동안 온도와 pH는 각

Table 4. Operating conditions for the conventional activated sludge process

Process	Items	HRT (hr)	SRT (d)	MLSS (mg/L)
Conventional Activated Sludge		5	5	2,000

각 20°C와 7±0.2를 유지하였다.

실험에 사용된 모든 슬러지는 실험전 10-12시간 동안 사전 포기 후 5분 동안 3,000 rpm에서 원심분리 후 증류수를 이용하여 미생물의 표면을 세척하는 전처리 공정을 거쳤다. 호기성 회분식 실험에서 외부 기질로 대표적인 RBCOD원인 아세테이트를 주입하였으며 오염물질의 거동특성을 위한 모든 시료의 분석은 멤브레인 필터(0.45 μm, Whatman)를 이용하여 여과 후 COD, 질소, 인, ML(V)SS, DO, pH 등의 항목에 대해 측정을 실시하였으며 모든 실험은 *Standard Methods* (APHA, 1995)에 준하여 실험하였다. 미생물의 기질이용과 성장은 호흡율의 변화와 매우 밀접한 관계를 갖으므로 기질이용 경로 추정의 지표인자로 미생물 호흡율의 변화를 모니터링 하였으며 microbial respirometric analyzer(KOWACO)를 이용하여 미생물의 호흡율 변화를 자동측정 하였다(Fig. 3). 호기성 회분식 실험시 Autotroph에 의한 산소소모의 영향을 배제하기 위해 Allylthiourea(ATU)를 20 mg/L가 되도록 투입하였다. 측정된 미생물의 실제 호흡율 변화값과 오염물질의 변화추이는 metlab 5.3(Math Works Inc.)을 이용하여 구성된 ASM No.3와 단계별 성장모델의 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 단계별 성장모델과 물질거동

미생물 내부에 축적된 ISCs의 농도는 내생호흡상태의 단위 미생물내 TCOD 농도와 외부기질과 접촉 후 ISCs가 축

Table 3. Process rates of the Step Growth Model

Process	Process rate equation (mg COD/l/hr)	Reference
Aerobic hydrolysis	$K_h \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{X_s/X_H}{K_X + X_s/X_H} X_H$	Dold <i>et al.</i> (1980) Henze <i>et al.</i> (1995)
Aerobic growth	$\frac{S_{O_2}}{\mu_H K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{X_{STO}/H_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} X_H$	Gujer <i>et al.</i> (1999)
Aerobic growth on X <sub>sto</sub>	$\mu_H \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{K_S}{K_S + X_{STO}/X_H} \frac{X_{STO}/X_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} X_H$	Chundakkau and van Loosdrecht (1999)
Aerobic growth on X <sub>ISCs</sub>	$\mu_{ISCs} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{K_S}{K_S + X_{ISCs}/X_H} \frac{X_{ISCs}/X_H}{K_{ISCs} + X_{ISCs}/X_H} X_H$	Step Growth Model
ISCs storage	$K_{STO} = \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_S}{K_S + S_S} X_H$	Henze <i>et al.</i> (1995) Gujer <i>et al.</i> (1999) Step Growth Model
Aerobic growth on external substrate	$K_{STO} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{S_S}{K_S + S_S} X_H$	Henze <i>et al.</i> (1987) Gujer <i>et al.</i> (1999) Step Growth Model
Aerobic endogenous respiration	$b_H \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} X_H$	Gujer <i>et al.</i> (1999) Step Growth Model
Aerobic respiration of X <sub>ISCs</sub>	$b_{ISCs} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} X_{ISCs}$	Gujer <i>et al.</i> (1999) Step Growth Model

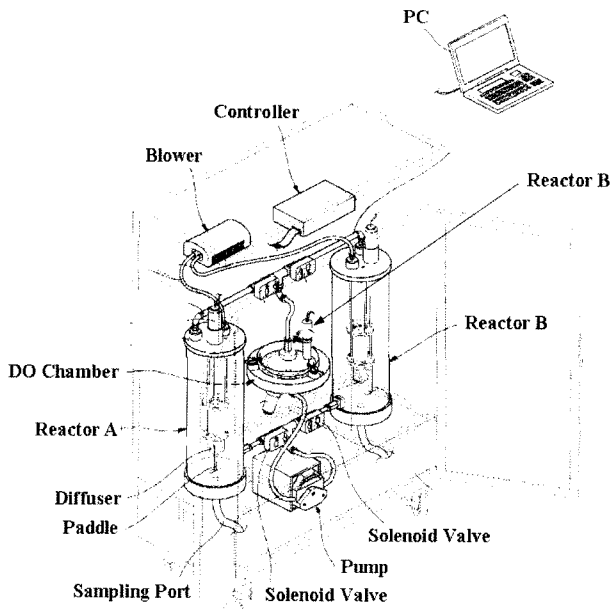


Fig. 3 Schematic diagram of microbial respirometric analyzer

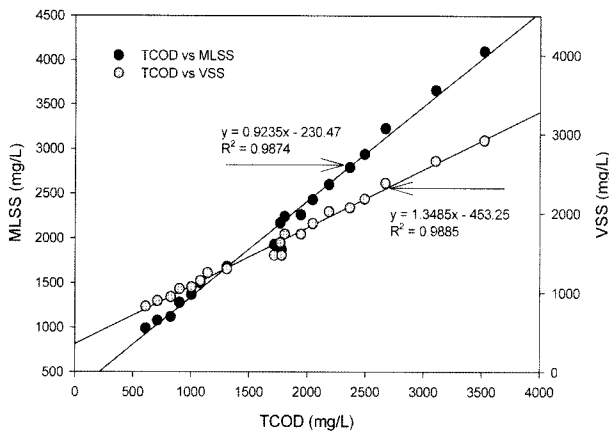


Fig. 4 The correlation between ML(V)SS and TCOD under the endogenous respiration conditions

적된 단위 미생물의 TCOD 농도차를 이용하여 계산하였다. 기준이 되는 내생호흡상태의 일반 활성슬러지내 VSS와 MLSS의 TCOD 농도는 Fig. 4와 같았다. 이 외에도, 소모된 NH<sub>4</sub>-N의 농도를 통해 active biomass의 생성량을 검증하였다.

호기성 상태에서 미생물의 내·외부 기질이용 경로를 살펴보기 위해 수행된 실험에서 외부 RBCOD원으로 사용된 아세테이트와 암모니아의 결과에 대한 실험값과 단계별 성장 모델에 기초한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같이 나타났다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, 아세테이트의 농도는 초기 주입과 동시에 급격하게 감소되고 주입된 아세테이트의 대부분은 60분 이내에 소모되는 것으로 나타났다. 반면, 실험기간 동안 암모니아의 농도는 크게 변화하지 않았는데, 이는 ATU에 의한 질산화 기작이 제어되고 있음을 알 수 있는 결과로 기질이용에 따른 active biomass의 농도 증가로 인한 미량의 NH<sub>4</sub>-N의 감소만이 관측되었다. ISC's의 농도는 첨가된 외부 RBCOD가 거의 소모될 때까지 계속적으로 증가하는 것으로 나타났고, 외부 기질이 모두 고갈된 이후 감소하였다. 이러한 현상은 외부 RBCOD 고갈된 후 미생물의 내

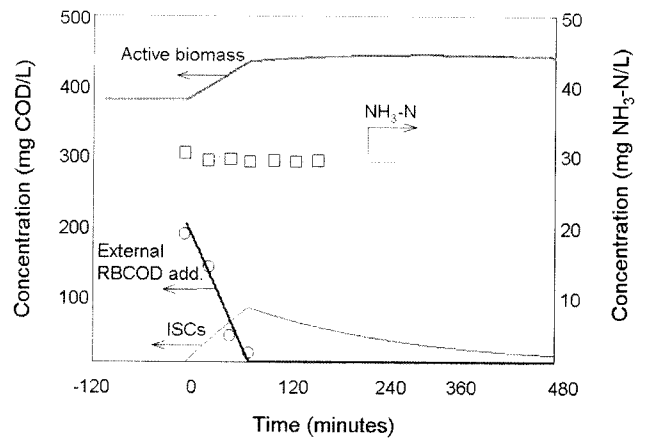
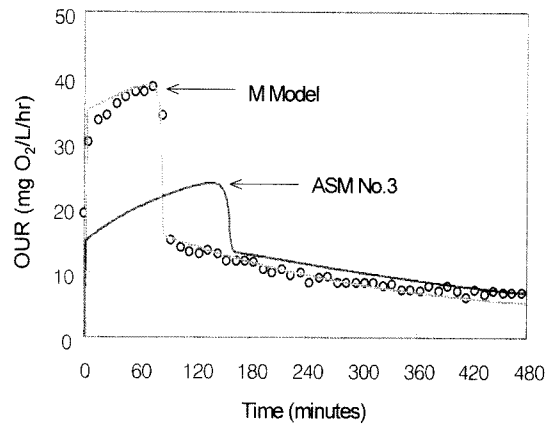
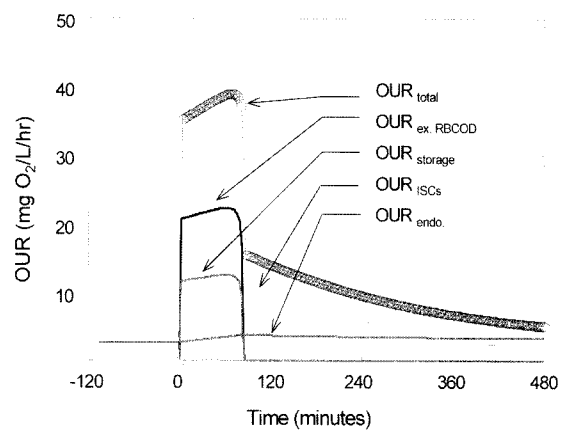


Fig. 5 The simulation results of active biomass and ISC's with the Step Growth Model



a) Result of the simulated OUR profile



b) Compositions of simulated OUR profiles with the Step Growth Model

Fig. 6 Experimental and simulated OUR profiles with acetate

부로 저장되었던 ISC's가 또 다른 기질로서 미생물에게 활용되고 있음을 나타내는 결과로써 물질수지의 관점에서 볼 때, 모든 제거된 외부 RBCOD는 세포 합성에 즉시 사용되지는 못하지만, 일부는 ISC's로 저장되고 일부는 외부기질을 성장에 이용한 것으로 판단되었다.

### 3.2 Simulation 결과 비교

ASM No.3와 단계별 성장모델과의 시뮬레이션 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이, ASM No.3가 외부기질을 ISC's 형태로 저장하고 이후 ISC's를 이용하여 성장할 경우 ASM No.3에서 제안하는 Y<sub>sto</sub>.와

YH로는 미생물과 기질의 접촉초기에 나타나는 급격한 기질 소모와 호흡율의 증가를 시뮬레이션 할 수 없었다. 그러나, 미생물이 외부 기질과 접촉초기에 외부기질을 이용한 성장과 ISC<sub>s</sub> 생성이 동시에 일어나며 외부기질이 고갈된 후 저장된 ISC<sub>s</sub>를 활용하는 단계별 성장 모델의 경우 실제 상황에서 나타나는 산소 이용율(Oxygen Uptake Rate; OUR) 그래프의 초기 피크치에 더 일치하는 것을 알 수 있었다. 이후 외부기질이 고갈된 조건에서 나타나는 호흡율 그래프의 꼬리 현상은 두 모델 모두 유사한 결과를 시뮬레이션 나타내었는데 이는 ISC<sub>s</sub>를 이용한 미생물의 증식과 유지가 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

이상의 실험결과와 시뮬레이션 결과를 토대로 내생호흡상태에 노출된 미생물의 경우, 외부기질과 접촉하는 반응 초기 단계에서 미생물은 외부기질을 이용한 대수성장이라는 전통적인 미생물 성장 동력학적 반응을 수행함과 동시에 미생물 내부로의 ISC<sub>s</sub> 저장과정을 동시 수행함으로써 외부 기질의 고갈에 대비하는 것으로 추정되었다. 또한 미생물의 성장은 미생물과 외부기질이 접촉하는 초기단계에서 급속히 일어나며 이후 ISC<sub>s</sub>에 의한 성장이 일어나는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

호기성 회분실험을 통해 구해진 오염물질의 거동특성과 모델 시뮬레이션 결과를 통해 다음과 같이 결론을 얻을 수 있다.

1. ASM No.3와 단계별 성장이론에 기초한 미생물 성장 동력학의 시뮬레이션 결과 단계별 성장이론에 근거한 활성슬러지 모델이 OUR을 이용한 실험값의 시뮬레이션 결과에 더 일치하는 것으로 나타났다. 이는 내생호흡상태의 미생물이 외부기질과의 접촉 초기에 외부기질을 이용한 미생물 세포합성과 성장이 일어날 뿐만 아니라 동시에 미생물 내부의 ISC<sub>s</sub>를 형성하는 결과로 판단되었다.
2. 이 같은 기질이용 경로와 ISC<sub>s</sub>의 합성 및 재이용의 결과는 인 제거와 관련해 고려되어 오던 혐기성 조건에서의 기질저장 현상이 호기조건으로만 구성되어 있는 일반 활성슬러지 공정내 미생물에서도 발현됨을 의미하며, 질소 인 제거시 탄소원의 효율적 이용이라는 관점에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 기호설명

- $Y_H$  = Heterotrophic yield on external substrate (mgCOD<sub>XSTO</sub>/mgCOD<sub>S<sub>s</sub></sub>)
- $Y_{STO}$  = Aerobic yield of stored product per S<sub>s</sub> (mgCOD/mgCOD)
- $Y_{gro.ISCs}$  = Heterotrophic yield on ISC<sub>s</sub> (mgCOD/mgCOD)
- $S_S$  = Soluble biodegradable substrate (mgCOD/L)
- $S_O$  = Oxygen (mgO<sub>2</sub>/L)
- $S_{NH}$  = Ammonia (mgN/L)
- $X_H$  = Active heterotrophic biomass (mgCOD/L)
- $X_S$  = Particulate biodegradable organic matter (mgCOD/L)

- $X_P$  = Inert particulate organic matter (mgCOD/L)
- $X_{STO}$  = Organic storage products of X<sub>H</sub> (mgCOD/L)
- $X_{ISCs}$  = Stored ISC<sub>s</sub> of X<sub>H</sub> (mgCOD/L)  
 주) 본 논문에서  $X_{ISCs}$ 는 내부저장물질전체를 의미함
- $\mu_H$  = Maximum growth rate on substrate (/d)
- $\mu_{ISCs}$  = Maximum growth rate on ISC<sub>s</sub>(/d)
- $K_h$  = Hydrolysis rate constant (/d)
- $K_S$  = Saturation coefficient for S<sub>s</sub> (mgO<sub>2</sub>/L)
- $K_X$  = Saturation coefficient for X<sub>s</sub> (mgO<sub>2</sub>/L)
- $k_{STO}$  = Storage rate constant (mgS<sub>s</sub>/mgX<sub>H</sub>)
- $K_{STO}$  = Saturation coefficient for X<sub>STO</sub> (mgCOD<sub>XSTO</sub>/mgCODX<sub>H</sub>)
- $K_O$  = Oxygen half-saturation coefficient (mgO<sub>2</sub>/L)
- $K_{NH}$  = Ammonia half-saturation coefficient (mgN/L)
- $b_H$  = Aerobic endogenous respiration rate for X<sub>H</sub> (/d)
- $b_{ISCs}$  = Aerobic respiration rate for X<sub>STO</sub> (/d)
- $f_i$  = Production of X<sub>I</sub> in endogenous respiration (mgCOD<sub>XI</sub>/mgCOD<sub>XBM</sub>)
- ISC<sub>s</sub> = Intracellular storage compounds (mgTCOD/L)

#### 참고문헌

- APHA, AWWA and WEF (1995) standard Methods of the Examination of Water and Wastewater, 19th Eds., Washington D.C.
- Chundakkau K. and van Loosdrecht M.C.M. (1999) Substrate flux into storage and growth in relation to activated sludge modeling, *Wat. Res.* Vol. 33, No. 14, pp. 3149-3161.
- Dold, P.L., Ekama, G.A., and Marais, G.v.R. (1980) A general model for the activated sludge. *Progress in Water Technology*, Vol. 12, No. 6, pp. 47-77.
- Gujer, W., Henze, M., Mino, T., and van Loosdrecht, M. (1999) Activated sludge Model No. 3. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 39, No. 1, pp. 183-193.
- Henze, M., Grady, C.P.L. Jr, Gujer, W., Marais, G.v.R., and Matsuo, T. (1987) Activated sludge Model No. 1. *IAWPRC Scientific and Technical report No.1*. IAWPRC, London.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J.L.C., and Arvin, E. (1995) *Wastewater Treatment Biological and Chemical Processes*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 55-111.
- Kim, Y.K., Seo, I.S., Kim, H.S., and Kim, J.Y. (2005) New approach the substrate utilization and respiration by the step growth model concept in activated sludge model. *2ndIWA-ICA2005*, pp. 4-14.
- Majone, M., Massanisso, P., Carucci, A., Lindrea, K., and Tondoi, V. (1996) Influence of storage on kinetic selection to control aerobic filamentous bulking. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, No. 5-6, pp. 223-232.
- Spanjers, H., Party, G.G., and Keesman, K.J. (2001) On-line model calibration at a full-scale WWTP. *Progress in ICA 2001*, Vol. 2, pp. 475-482.
- van Aalst-van Leeuwen, M.A., Pot M.A., van Loosdrecht, M.C. M., and Heijnen, J.J. (1997) Kinetic modeling of poly-(β-hydroxybutyrate) production and consumption by *Paracoccus pantotrophus* under dynamic substrate supply., *Biotech. Bioeng.*, Vol. 55, No. 5, pp. 773-782.

(접수일: 2006.4.18/심사일: 2006.5.22/심사완료일: 2006.5.22)